

链式多电平变换器特定谐波消除脉宽调制方法研究

郭 涛,孙玉坤,任明炜,段大鹏

(江苏大学 电气信息工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:链式多电平变换器调制方法中,特定谐波消除脉宽调制 SHEPWM(Selected Harmonic Elimination Pulse Width Modulation)具有输出波形质量高、消除谐波效果好、直流电压利用率高等优点。研究了链式多电平变换器的 SHEPWM 技术,针对其 1/4 周期对称的阶梯波形,给出了一种每个 H 桥开关频率相同的控制方法,同时列出了该方法下的链式多电平变换器的 SHEPWM 通用非线性超越方程组,重点提出了利用单个 H 桥的开关角度叠加求取初值的方法。以 5 电平链式多电平变换器为例,通过 Matlab 仿真证明了结论的正确性。

关键词:链式多电平变换器;特定谐波消除脉宽调制;H 桥

中图分类号:TM 76;TM 464 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-6047(2006)12-0052-03

0 引言

近年来,在高电压、大功率应用场合,多电平变换器降低了开关元件的耐压和开关过程中的 du/dt ,改善了输出波形,引起了人们越来越多的关注。在达到同样的多电平数的条件下,链式变换器相对于二极管箝位型和飞跨电容型变换器而言,具有开关频率低、需要最少数量的器件、可实现模块化和易于采用软开关技术等优点,在多电平变换器 3 种基本拓扑电路中更加受到人们的关注^[1-2]。

链式多电平变换器是有多个输出为 3 电平的 H 桥串联而成,输出电平数 $n=2M+1$ (其中 M 为串联 H 桥的个数),现有的用于变换器的调制方法都可以用于链式多电平变换器中^[3-4]。特定谐波消除脉宽调制法 SHEPWM(Selected Harmonic Elimination Pulse Width Modulation)通过选择特定的开关时刻,消除选定的低次谐波,改善输出波形。在波形质量相同的情况下,可以降低开关频率,有较高的直流电压利用率。同时,由于链式多电平变换器输出电压是各 H 桥输出电压的叠加,电平数的增加可使输出电压为梯形,更加接近正弦波,谐波含量进一步减少^[5-7]。本文通过对链式多电平变换器 SHEPWM 非线性方程组的建立和求解,并以 5 电平链式多电平变换器为例,仿真验证了方法的正确性。

1 链式多电平变换器的 SHEPWM 工作原理

链式多电平变换器的电路基本拓扑如图 1 所示。每一相链式多电平变换器由若干个具有独立直流电容的 H 桥串联而成,每个 H 桥都工作在 2 电平的模式下,这样若干个 H 桥串联,可以形成一个接近正弦

波的阶梯波,可以消除低次谐波,减少输出波形的谐波含量。图 2 为单个 H 桥在 SHEPWM 方法下的输出电压波形,图中 U_c 为单个 H 桥直流侧电容的电压。

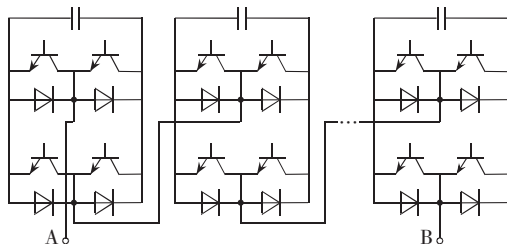
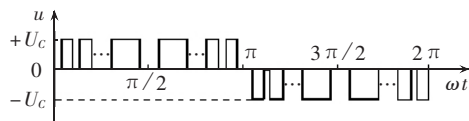
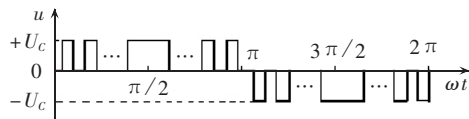


图 1 链式变换器单相电路图

Fig.1 One phase circuit topology of cascade multilevel converter



(a) N 为偶数



(b) N 为奇数

图 2 单个 H 桥输出电压

Fig.2 Output voltage waveforms of single H-bridge

图 2 波形可以用傅里叶级数表示为

$$u(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(t) dt \quad (2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos n\omega t dt \quad n=1,2,3,\dots \quad (3)$$

$$b_n=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}u(t)\sin n\omega tdt\quad n=1,2,3,\cdots\quad (4)$$

定义 N 为单个 H 桥 $1/4$ 周期的开关角度个数。由图 2 可见,无论 N 为奇数还是偶数,单个 H 桥的输出波形总是具有半波奇对称性和 $1/4$ 对称性^[8]。根据这些特性可以得到, N 值也就是单个 H 桥一个周期的开关次数,同时可得:

$$u(t)=\sum_1^{\infty}b_n\sin n\omega t\quad n=1,3,5,7,\cdots\quad (5)$$

$$b_n=\frac{4U_c}{n\pi}\sum_{k=1}^N(-1)^{k+1}\cos(n\alpha_k)$$

$$0^\circ\leq\alpha_1<\alpha_2<\cdots<\alpha_N\leq90^\circ$$

可见单个 H 桥在 SHEPWM 方法下的输出电压波形只含有奇数次的谐波。

2 5 电平 SHEPWM 方程组的建立和求解

2.1 方程组的建立

通过傅里叶分析可以得出一相中第 i 个 H 桥在 SHEPWM 方法下的输出电压表达式为

$$u_i(t)=\sum_{n=1}^{\infty}u_{i(n)}\sin n\omega t\quad n=1,3,5,7,\cdots\quad (6)$$

式中 $u_{i(n)}$ 为该 H 桥的第 n 次谐波电压幅值。
将每相中若干个 H 桥叠加就可以得到链式多电平变换器输出相电压的表达式^[3]。

$$u_o(t)=\sum_{i=1}^M\sum_{n=1}^{\infty}u_{i(n)}\sin n\omega t\quad n=1,3,5,7,\cdots\quad (7)$$

式中 M 表示一相中串联 H 桥的个数。

由式(7)可以得到变换器输出相电压中的第 n 次谐波的幅值为

$$u_n=\frac{4U_c}{n\pi}\sum_{i=1}^M\sum_{k=1}^N(-1)^{k+1}\cos(n\alpha_{ik})\quad n=1,3,5,7,\cdots\quad (8)$$

通过式(8)可以看出,谐波的幅值同链式多电平变换器每相串联的 H 桥个数 M 和开关个数 N 都存在非线性的关系。

这里定义变换器相输出电压的基波幅值与 M (一相中串联 H 桥的个数)倍单个直流电容电压的幅值比为调制比 m ,即 $m=u_1/(MU_c)$ 。在串联 H 桥个数 M 确定的情况下,谐波幅值仅与开关个数 N 有关。可以通过开关角度个数 N ,联立出 MN 个非线性超越方程,在选定基波幅值即一次谐波 u_1 的基础上,可消除 $MN-1$ 个低次谐波。由于波形的对称性,偶次谐波已经消除,同时在线电压中 3 及其倍数次谐波也不存在,这样可以消除 $MN-1$ 个非 3 倍数次的奇数谐波,即

$$\begin{aligned}u_1&=mMU_c\\u_n&=0\quad n=5,7,11,13,\cdots\end{aligned}\quad (9)$$

约束条件为 $0^\circ\leq\alpha_{i1}<\alpha_{i2}<\cdots<\alpha_{iN}\leq90^\circ$,其中, α_{i1} 、 α_{i2} 、 $\cdots$ 、 α_{iN} 为第 i 个桥的开关角度。

可以很明显地看出 H 桥个数 M 不变的情况下, H 桥增加一个开关角度,即 $N+1$ 个开关角度,那可

以联立出 $M(N+1)$ 个方程,来消除 $M(N+1)-1$ 个非 3 倍数次的奇数谐波,比 N 个开关角度时,可多消除 M 个谐波。同理 H 桥开关角度个数 N 不变的情况下,增加一个 H 桥,可联立出 $N(M+1)$ 个方程,多消除 N 个谐波。

2 个 H 桥串联输出为 5 电平电压波形,这样这里的 M 为 2。可以得到 5 电平链式多电平变换器 SHEPWM 开关角度的非线性方程组。

$$\cos\alpha_{11}-\cos\alpha_{12}+\cos\alpha_{13}+\cos\alpha_{21}-\cos\alpha_{22}+\cos\alpha_{23}=\frac{\pi}{2}m$$

$$\cos5\alpha_{11}-\cos5\alpha_{12}+\cos5\alpha_{13}+\cos5\alpha_{21}-\cos5\alpha_{22}+\cos5\alpha_{23}=0$$

$$\cos7\alpha_{11}-\cos7\alpha_{12}+\cos7\alpha_{13}+\cos7\alpha_{21}-\cos7\alpha_{22}+\cos7\alpha_{23}=0$$

$$\cos11\alpha_{11}-\cos11\alpha_{12}+\cos11\alpha_{13}+\cos11\alpha_{21}-\cos11\alpha_{22}+\cos11\alpha_{23}=0$$

$$\cos13\alpha_{11}-\cos13\alpha_{12}+\cos13\alpha_{13}+\cos13\alpha_{21}-\cos13\alpha_{22}+\cos13\alpha_{23}=0$$

$$\cos17\alpha_{11}-\cos17\alpha_{12}+\cos17\alpha_{13}+\cos17\alpha_{21}-\cos17\alpha_{22}+\cos17\alpha_{23}=0$$

$$\text{约束条件为 } 0^\circ\leq\alpha_{i1}<\alpha_{i2}<\cdots<\alpha_{iN}\leq90^\circ。$$

2.2 方程组的初值选取和求解

很明显式(9)为一个非线性超越方程组,一般只能用迭代法进行求解^[8-10]。这样就需要一个初值,同时这个初值的选取与最后迭代的结果是否收敛有直接的关系,因此初值的选取非常重要。同时,收敛范围随着 M 、 N 和 m 的变化,也是变化的,不同的取值,收敛范围是不同的。由于链式变换器,是由 M 个 H 桥的叠加,每个 H 桥又有 N 个开关角,总共可以消除 $MN-1$ 个低次谐波。

输出电压为 5 电平时, $M=2$,本文为了简单起见,取 $N=3$,这样 2 个 H 桥串联,有 6 个开关角度,即有 6 个自由度,可以消除 5、7、11、13、17 次谐波。

由于是 2 个 H 桥的叠加,选取 1 个 H 桥在 $N=3$ 情况下,以文献[8]提出的方法,得到使用 SHEPWM 方法分别消除 5、7 和 11、13 次的开关角度结果,并将其进行叠加为初值。利用 α 对 m 的连续可微性,以步长为 0.01 改变 m ,将上次的迭代结果依次作为下个改变后 m 的迭代初值,最终得到快速收敛的迭代结果,求出所有的开关角。根据工程需要,给出了 m 在 0.35~1 范围内的解轨迹(见图 3)。表 1 给出了 $m=1$ 、 $N=3$ 情况下的初始角度和迭代结果。

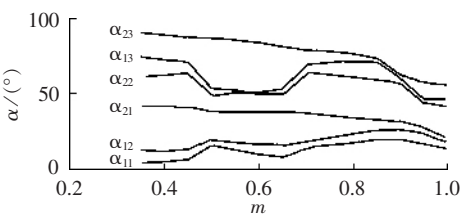


图 3 解轨迹图

Fig.3 The trajectory of switching angles

表 1 输出为 50 Hz 的 SHEPWM 开关角
Tab.1 Switching angle of SHEPWM(50 Hz) (°)

初始角度	迭代角度	初始角度	迭代角度
14.2	13.8	15.9	21.2
36.1	18.1	48.5	46.9
41.4	41.8	57.3	56.3

3 5 电平 SHEPWM 的仿真研究

为了研究上述 SHEPWM 的谐波消除效果,采用 Matlab 仿真软件对 5 电平链式多电平变换器进行仿真研究。取 $U_c=2\text{ kV}$ (单个 H 桥直流电容电压)、 $N=3$ 、 $m=1$ 和 $m=0.5$,表 1 和解轨迹中开关角度下的仿真波形分别如图 4 和图 5 所示,图中 u_p 为相电压, u_L 为线电压, h 为谐波次数, λ 为基波与谐波含量。

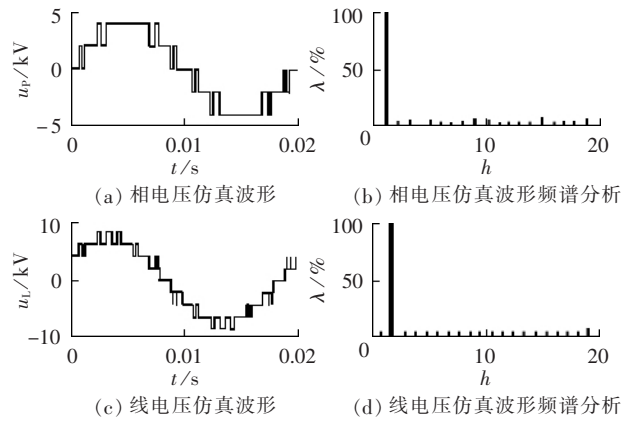


图 4 $m=1$ 的 5 电平仿真波形

Fig.4 Simulation waveforms of five-level voltage($m=1$)

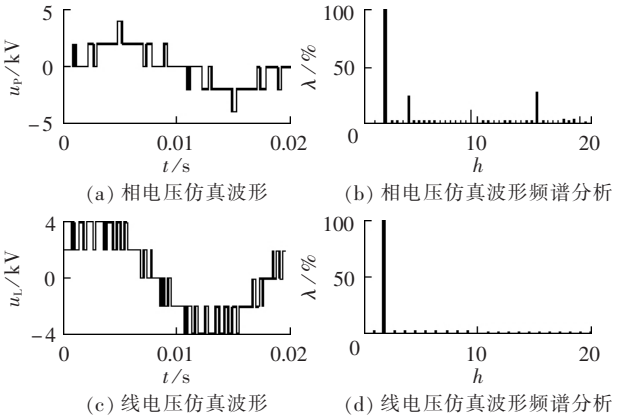


图 5 $m=0.5$ 的 5 电平仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of five-level voltage($m=0.5$)

在图 4(a)和图 5(a)中可以明显地看出输出电压为 5 电平。从图 4(b)和图 5(b)中所示的 2 组相电压仿真波形频谱分析中可以看出 5、7、11、13、17 次谐波基本上已经被消除。从图 4(d)和图 5(d)中所示的 2 组线电压仿真波形频谱分析中可以看到,3 及其倍数次谐波也被完全消除,总的电压谐波畸变率很小。可见在不改变每个 H 桥的开关角度个数,保持开关器件工作在低频的情况下,只增加串联 H 桥的个数完全能够提高输出波形的质量,进一步减小输出波形的谐波含量。

4 结论

链式多电平变换器使用 SHEPWM 方法,直流电压利用率高,开关频率低,所需开关器件耐压低,输出波形质量很高,谐波消除理想。随着链式串联 H 桥的个数和每个 H 桥开关角度个数的增加,可消除的谐波个数分别成 N 倍和 M 倍个数的增加。

随着新型开关管 IGCT 的使用,可以通过不增加串联 H 桥个数的情况下,大量增加开关角的个数来实现更高质量的波形输出,可大量降低成本。触发脉冲的离线计算和查表,也将随着以 DSP 为代表的高速计算芯片和大容量存储芯片成本上的降低,逐步被实时计算和查表代替。这些都将使得 SHEPWM 技术的使用更为广泛。

另外,需注意是:这种调制方法在三角形连接的变换器中,存在着较大的 3 次谐波环流,虽然不流入系统,但是对每一个 H 桥的开关器件有着较大的影响,有可能导致开关器件的损坏。

参考文献:

[1] FANG Zheng - peng, LAI Jih - sheng. Dynamic performance and control of a static var generator using cascade multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1997, 33(3):748-755.

[2] 陈阿莲,何湘宁,赵荣祥. 一种改进的级联型多电平变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):9-12.

CHEN A-lian, HE Xiang-ning, ZHAO Rong-xiang. An improved cascaded multilevel inverter topology[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(11):9-12.

[3] 袁志昌,宋强,滕乐天,等. 大容量链式 STATCOM 150 Hz 优化 PWM 控制策略的研究[J]. 电工技术学报,2004,19(8):83-87.

YUAN Zhi-chang, SONG Qiang, TENG Le-tian, et al. 150 Hz Optimal PWM control for high-power STATCOM employing cascade multilevel inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(8):83-87.

[4] CORZINE K, FAMILIANT Y. A new cascaded multilevel H-bridge drive[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2002, 17(1):125-131.

[5] 佟为明,王宇虹,程树康,等. PWM 逆变器特定消谐式谐波抑制技术的研究[J]. 高技术通讯,2001(9):68-71.

TONG Wei-ming, WANG Yu-hong, CHENG Shu-kang, et al. Research on selective harmonic elimination technique in PWM inverter[J]. Chinese High Technology Letters,2001(9):68-71.

[6] LI Li, CAZARKOWSKI D, LIU Y, et al. Multilevel selective harmonic elimination PWM technique in series-connected voltage inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2000, 36(1):160-170.

[7] PATIL K H, MATHUR R M, JIANG J, et al. Distribution system compensation using a new binary multilevel voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(2): 459-465.

[8] 费万民,吕征宇,姚文熙. 多电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(1):102-106.

FEI Wan-min, LÜ Zheng-yu, YAO Wen-xi. Research of selected harmonic elimination PWM technique applicable to multi-level voltage inverters[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(1): 102-106.

- [9] 李治典,周秦英,李宏,等. 实时求解特定消谐方程组的新算法[J]. 西北工业大学学报,2004,22(1):37-40.
LI Zhi-dian,ZHOU Qin-ying,LI Hong,et al. A novel algorithm for real-time solution of nonlinear surmount SHET equations[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2004,22(1):37-40.
- [10] 谢运祥,周炼,彭宏. 逆变器消谐 PWM 模型的同伦算法研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(10):23-26.
XIE Yun-xiang,ZHOU Lian,PENG Hong. Homotopy algorithm research of the inverter harmonic elimination PWM model[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(10):23-26.

作者简介:



郭 涛

郭 涛(1980-),男,江苏邳江人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电气传动(E-mail:mountain_gt@126.com);

孙玉坤(1958-),男,江苏靖江人,副校长,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电能质量、电机智能控制及电力电子技术应用。

Research on SHEPWM technique based on cascade multilevel converter

GUO Tao,SUN Yu-kun,REN Ming-wei,DUAN Da-peng
(School of Electrical and Information Engineering,
Jiangsu University,Zhenjiang 212013,China)

Abstract: Among several modulation methods of cascade multilevel converters,SHEPWM (Selected Harmonic Elimination Pulse Width Modulation) has advantages,such as high quality of output waveform,excellent effect on harmonic elimination and full use of DC voltage. Based on the analysis of SHEPWM,a control method,in which the switching frequency of each H-bridge is same,is proposed according to the quarter symmetric waveform,and its universal nonlinear exceeding equations are listed. Initial values are obtained by adding all single H-bridge switching angles together. The conclusion is verified by simulating a five-level cascade converter with Matlab.

This project is supported by the New and High-technology Project of Jiangsu Province(BG200424).

Key words: cascade multilevel converter; selected harmonic elimination pulse width modulation; H-bridge